

УДК 549.08

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОДЫ

*В.М.Алиевский, В.В.Гайдуков, Ю.Р.Яковлев, Р.М.Кадушников, И.В.Федорцов**
Уральский Государственный Технический Университет-УПИ. Физико-технический факультет
620002, Екатеринбург, Мира, 19/5

**Тюменское отделение СургутНИПИнефть, лаборатория литологии*

Поступила в редакцию 19 марта 2005 г.

В статье описан комплекс анализа изображений, предназначенный для автоматизации петрографических исследований керна. Комплекс решает задачи определения фазового и гранулометрического состава керна путем анализа интерференционной окраски минералов по серии изображений, снятых на разных углах поворота столика микроскопа. Определение фазового состава производится по восстановленному изображению, которое суммирует информацию о цвете и яркости объектов на изображениях для каждого угла поворота. Для определения фазового состава используются методы кластеризации данных.

Алиевский В.М. - сотрудник ООО "СИАМС".
Область научных интересов: прикладная математика.

Автор 42 публикаций.

Гайдуков В.В. - сотрудник ООО "СИАМС".
Область научных интересов: анализ изображений

Автор 7 публикаций.

Яковлев Ю.Р. - технический директор
директор ООО "СИАМС", кандидат технических наук.

Область научных интересов: информатика, молекулярная физика

Автор 65 публикаций.

Кадушников Р.М. - директор ООО "СИ-АМС", кандидат технических наук.

Область научных интересов: компьютерное моделирование в материаловедении
Автор 100 публикаций.

Федорцов И.В. - начальник лаборатории литологии Тюменского отделения СургутНИПИнефть.

Область научных интересов: геология, исследования керна.

Автор 14 публикаций.

Введение

Для определения вещественного и гранулометрического состава горной породы в петрографии используется метод анализа интерференционной окраски минералов, возникающей при просмотре шлифа под микроскопом в проходящем поляризованном свете в скрещенных николях [1]. В процессе анализа при вращении столика микроскопа наблюдается изменение интенсивности прошедшего через шлиф света и проявление специфичной для каждого минерала текстуры и интерференционной окраски. Поворота столика микроскопа на 90° достаточно, чтобы изменение интенсивности прошедшего света составило полный цикл от минимума до максимума.

Определение вещественного и гранулометрического состава породы указанным методом сопряжено с рядом существенных трудностей.

1. Затруднено точное определение площади и процентного содержания каждого минерала на изображении.

2. Анализ вещественного и гранулометрического состава породы трудоемок и занимает значительное время.

Поэтому актуальны следующие проблемы: оптимизация процесса вещественного анализа, повышение его достоверности, получение точных количественных данных о вещественном и грап-

нулометрическом составе породы и уменьшение времени анализа. Для решения указанных проблем предлагается использовать методы анализа цифровых изображений исследуемого участка шлифа. При этом задача определения вещественного и гранулометрического состава породы сводится к обработке цифровых изображений, анализу и классификации объектов на изображениях. В рамках решения данной задачи на основе

анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел SIAMS700, разработано специализированное программное обеспечение Керн С7.

Исходными данными для решения поставленной задачи являются:

- Цветное изображение шлифа, снятое в параллельных николях, далее – *исходное* изображение. На этом изображении выделены поры, прокрашенные на этапе подготовки шлифа, рис 1.

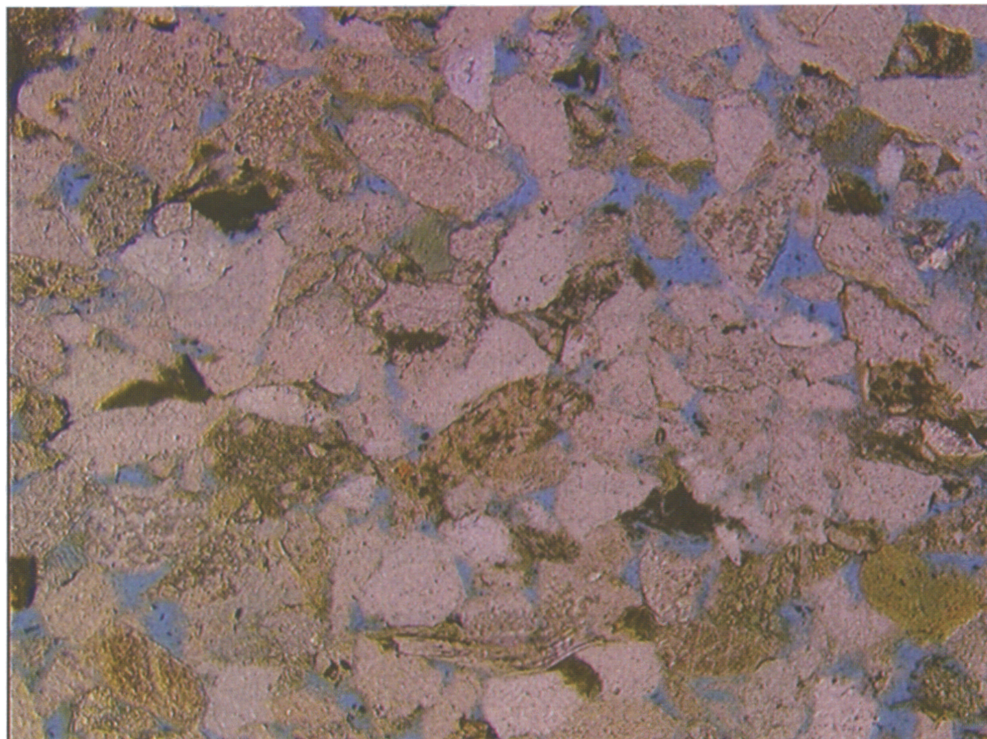


Рис.1. Исходное изображение

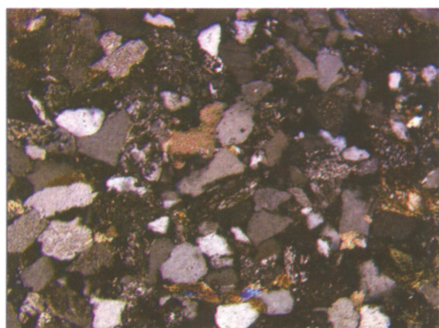


Рис.2, а. Угол поворота 0°

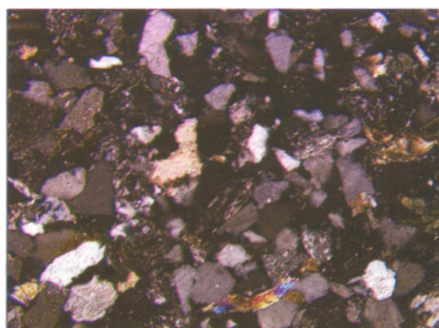


Рис.2, б. Угол поворота 20°

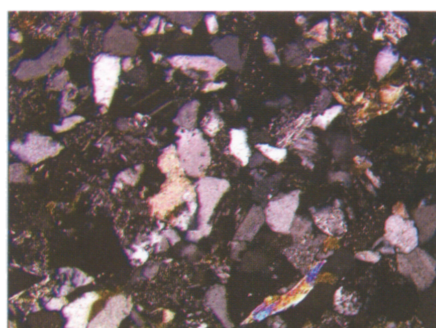


Рис.2, в. Угол поворота 40°

• Серия цветных изображений шлифа, снятых под микроскопом в поляризованном свете в скрещенных николях с изменяющимся углом поворота столика микроскопа, далее – *поляризованные* изображения, рис. 2, а - 2, в.

Предлагаемое решение основано на суммировании информации с серии изображений, полученных при повороте образца на заданный угол и восстановлении изображения, обобщающего характеристики цвета и интенсивности на каж-

дой стадии поворота.

Поскольку в серии поляризованных изображений, любая выбранная точка, принадлежащая одному и тому же объекту, имеет разные координаты, необходимой предварительной обработкой серии является разворот каждого изображения на угол, соответствующий углу поворота столика микроскопа.

Общепринятой практикой в петрографии является поворот столика с шагом 10°, то есть каж-

дое изображение серии повернуто на 10° относительно предыдущего. Если цифровое изображение смещено относительно оптической оси микроскопа, например, вследствие нарушенной центровки столика, то повернутое изображение оказывается сдвинутым относительно первого изображения в серии (с углом поворота 0°)

Для совмещения изображений используется поиск максимума ковариации:

$$\max \iint f(r)g(r+h)DS_r$$

где $f(r)$ функция интенсивности исходного изображения, h – вектор сдвига, $g(r)$ – функция интенсивности сдвинутого изображения. Результатом работы описанной процедуры является серия развернутых и совмещенных изображений (рис. 3, а-3, в).

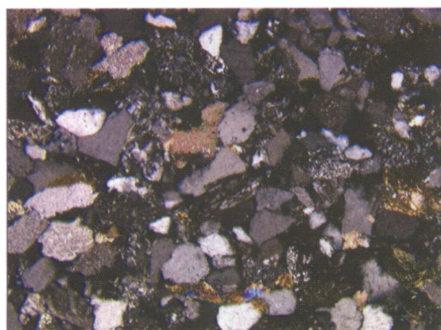


Рис.3, а. Угол поворота 0°

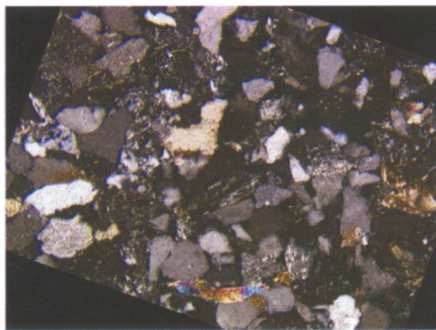


Рис.3, б. Угол поворота 20°

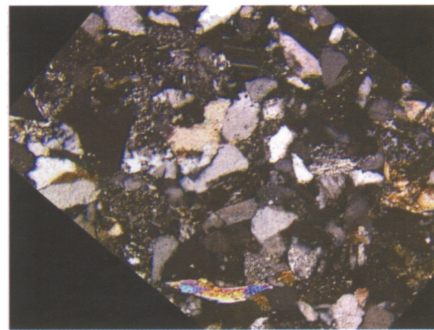


Рис.3, в. Угол поворота 40°

Построение системы параметров

При повороте столика микроскопа только центральная часть шлифа присутствует в поле зрения при всех углах поворота. В этой части поля зрения имеется полная информация об измене-

нии интенсивности и цветовых характеристиках прошедшего света и только в этой области результаты анализа наиболее достоверны. Границы области определяются границами совмещенных развернутых изображений серии, рис. 4.



Рис.4. Область достоверного анализа

Таким образом, в указанной части поля зрения анализ всех изображений серии позволяет получить полные данные о вещественном составе породы. В этой связи представляется перспективным построение и анализ обобщенных изображений, суммирующих информацию о цвете и интенсивности точек, составляющих объекты со всей серии поляризованных изображений. Для генерации таких изображений необходимо выбрать количественные параметры, описывающие указанные характеристики изображения.

После серии экспериментов в качестве коли-

чественных характеристик интенсивности были приняты 5%, 25%, 50%, 75%, 95% проценти́ли интенсивности точек Y компоненты изображений серии, взятые в апертуре (окрестности) текущей точки. Далее будем обозначать эти проценти́ли $P_{0.05}$, $P_{0.25}$, $P_{0.5}$, $P_{0.75}$, $P_{0.95}$. Апертюра задавалась квадратом, размер стороны апертюры изменялся в процессе анализа от 3 до 20 точек. Характеристикой цветности были выбраны проценти́ли $P_{0.05}$, $P_{0.25}$, $P_{0.5}$, по R , G , B компонентам изображений. В качестве характеристики текстуры выбраны размах проценти́лей Y компоненты в

апертуре, определенные следующим образом:

$$S_{0.05} = P_{0.95} - P_{0.05}, S_{0.25} = P_{0.75} - P_{0.25} \quad (1)$$

Эти характеристики вычисляются для одного

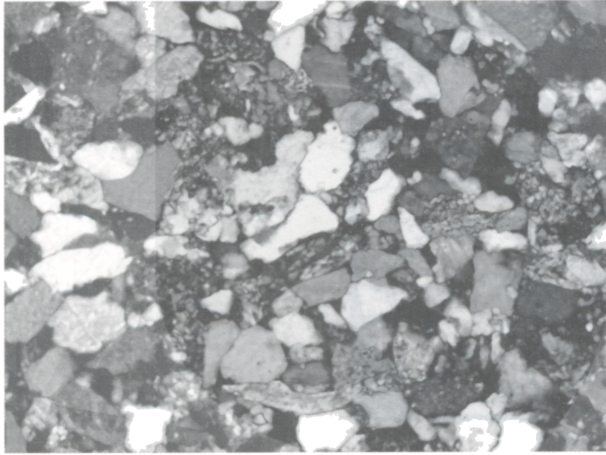


Рис. 5. AM

изображения. Далее авторами были определены дополнительные параметры, относящиеся к серии развернутых изображений (рис. 5-7). В каждой точке изображения вычисляются:

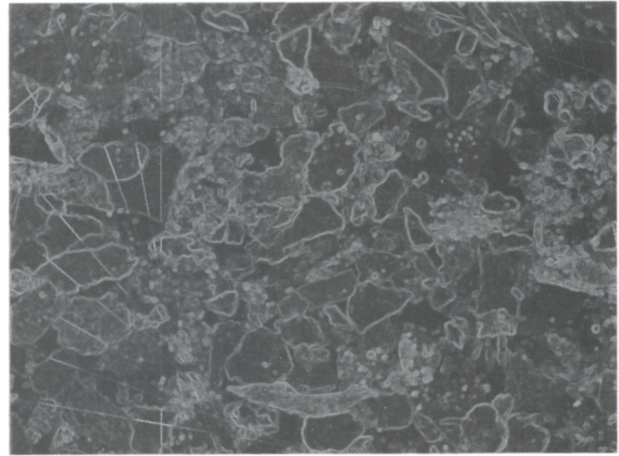


Рис. 6. SM_{0.25}



Рис. 7. Сумма CR, CG, CB

Размах медианы:

$$AM = \text{Max}(P_{0.5}[i]) - \text{min}(P_{0.5}[i]) \quad (2)$$

Максимум отклонений

$$SM_{0.05} = \text{max}(S_{0.05}[i]) \quad (3)$$

$$SM_{0.25} = \text{max}(S_{0.25}[i]) \quad (4)$$

где $i=0..9$ – номера изображений серии.

Для расчета следующих параметров значения $P_{.}[i]$ по R,G,B компонентам сортируются по возрастанию и в отсортированной последовательности выбираются 4 центральных значения: $i=3..7$. Таким образом, исключаются искажения цвета, вносимые точками с очень низкой и очень высокой яркостью.

$$CR = \frac{\sum_i P_{0.5R}[i]}{4} \quad (5)$$

$$CG = \frac{\sum_i P_{0.5G}[i]}{4} \quad (6)$$

$$CB = \frac{\sum_i P_{0.5B}[i]}{4} \quad (7)$$

Выделение пор.

Для корректного определения гранулометрического и вещественного состава породы, необходимо исключить из рассмотрения поры, выделенные на рис. 1 синим цветом. Операцией сегментации строим бинарное изображение пор (рис.8), которое будет использоваться далее в процедуре определения гранулометрического состава шлифа.

Определение вещественного состава

Определенные выше параметры позволяют

провести автоматическое определение следующих пороодообразующих компонент:

1. Кварц (без деления на подтипы)
2. Полевой шпат (без деления на подтипы)

3. Слюды (мусковит, биотит)
4. Карбонатный цемент (сидерит и кальцит)
5. Обломки кристаллических и осадочных пород (без деления на подтипы).

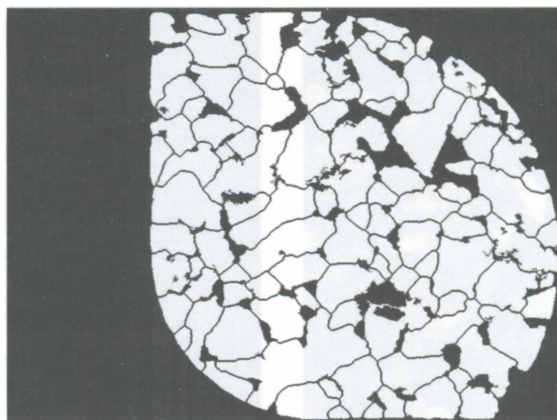


Рис. 8. Выделенные поры

Данные компоненты на исследованных автографах шлифов практически полностью представляют вещественный состав. Каждый компонент на изображении шлифа в визуальном характеризуется яркостью (интенсивностью) соответствующих точек изображения, цветом и текстурой (локальными перепадами интенсивности). Проведенная предварительно качественная оценка указанных параметров на выбранных компонентах показала следующее:

1. Кварц, шпат и обломки пород, как правило, имеют различную текстуру.
2. Слюды, кальцит и сидерит имеют ярко выраженную специфичную для каждой фазы окраску.

Для программной реализации процедуры оп-

ределения вещественного состава была построена система информативных параметров, с помощью которых можно уверенно отделить один пороодообразующий компонент от другого. После этого производилась кластеризация точек в пространстве параметров [2]. В настоящей работе реализован алгоритм "Ж" внутригрупповых средних", который в качестве критерия принадлежности точек изображения к кластеру использует евклидово расстояние от точки до центра кластера в многомерном пространстве параметров.

Для построения системы параметров был проведен анализ обобщенных характеристик пороодообразующих компонентов. В результате анализа были получены следующие данные.

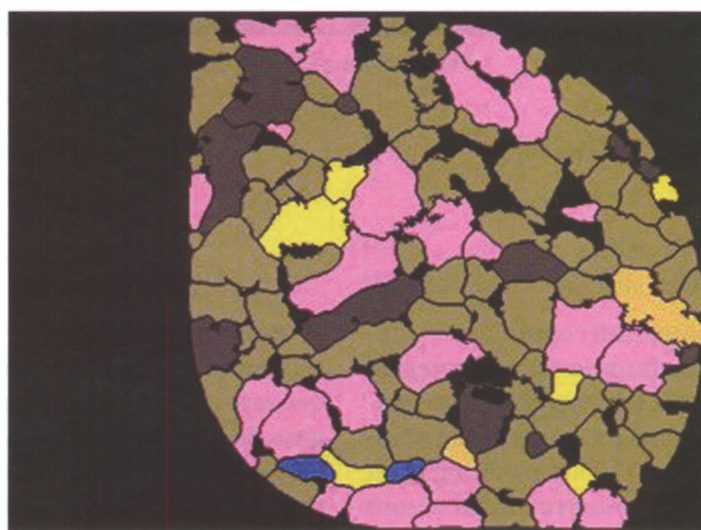


Рис.9. Выделенные зерна минералов

В зависимости от величины АМ (2) анализируемые компоненты можно условно разделить на 2 класса – оптически активные и оптически не-

активные. У зерен компонентов, относящихся к первому классу, размах медианы может значительно изменяться в зависимости от ориентации

лоскости сечения оптической индикатрисы плоскостью шлифа относительно оптической оси. К этому классу можно отнести кварц, полевой шпат, слюду. У компонентов, относящихся ко второму классу, величина АМ изменяется относительно слабо или практически постоянна в пределах всей серии. К этому классу можно отнести сидерит, а также скопления обломков кристаллических пород, размеры частиц которых меньше размера апертуры, а ориентация в пределах апертуры хаотична, что приводит к уменьшению размаха медианы в этой области. Следовательно, использовать АМ в качестве критерия отделения кварца, полевого шпата и слюды от обломков и цемента можно только при достаточно большой величине АМ. Эмпирически эта величина была установлена $AM > 30$.

Как было установлено, на изображениях, снятых в поляризованном свете при скрещенных николях, кварц, полевой шпат и обломки пород имеют различную текстуру. Следовательно, количественные характеристики текстуры можно использовать для разделения этих компонентов. В настоящей работе использовались характеристики, определенные следующим образом:

1. Сумма горизонтальных перепадов интенсивности

$$S_H = \sum_y \sum_x^{asy \times asx} I(|a[x,y] - a[x+1,y]| > hthresh), \quad (8)$$

где $I(true)=1$, $I(false)=0$, $a[x,y]$ – интенсивность точки изображения, $hthresh$ – порог интенсивности, asx , asy – размеры апертуры

2. Сумма вертикальных перепадов интенсивности

$$S_V = \sum_y \sum_x^{asy \times asx} I(|a[x,y] - a[x,y+1]| > vtresh). \quad (9)$$

Количество мод интенсивности

$$C_m, \text{ количество } i, \text{ таких, что } h[i] > perc, \quad (10)$$

где $h[i]$ – гистограмма интенсивности, построенная по апертуре, $perc$ – уровень сечения гистограммы

3. Градиент Бойхера

$$grad = P_{0.95} - P_{0.05}, \quad (11)$$

где P – проценти гистограммы интенсивности по апертуре

Указанные параметры строились по изображению размаха медианы АМ (2), полученному с квадратной апертурой 5х5.

Исключительный случай представляют полевые шпаты с проявляющимися двойниковыми

параллельными полосами на теле зерна. Значения текстурных параметров на остальной поверхности таких зерен практически совпадают со значениями для кварца. Для правильной классификации подобных зерен, необходима дополнительная ручная обработка результатов.

Минералы с ярко выраженной интерференционной окраской хорошо выделяются процедурой сегментации с предварительной настройкой диапазона сегментации. Изменение этого диапазона незначительно от серии к серии.

Особый случай представляют собой обломки пород с низкой средней интенсивностью и зерна кристаллических минералов, у которых сечение оптической индикатрисы плоскостью шлифа ориентировано перпендикулярно оптической оси. Для таких зерен размах медианы, как правило, не превышает эмпирически установленного порога, равного 30. Значения текстурных параметров в этом случае приблизительно одинаковы на зернах полевого шпата, кварца и обломках. Поэтому были введены дополнительные параметры классификации.

1. Градиент Бойхера по исходному изображению.

2. Количество мод интенсивности по исходному изображению

Определение гранулометрического состава шлифа

Определение гранулометрического состава породы производилось путем определения размеров зерен минералов. Такой способ определения гранулометрического состава позволяет непосредственно проводить измерение любых геометрических характеристик зерен, в отличие от других методов (например, метода секущих) [3]. В качестве размера зерна использовался диаметр круга, эквивалентного по площади.

Для выделения зерен использовались методы морфологической обработки [3] изображения $SM_{0.25}$, построенного для квадратной апертуры 5х5. Результат выделения зерен представлен на рис 9.

Обсуждение результатов эксперимента

В Приложении 1 приведен сравнительный анализ трех шлифов, выполненный по методу Черникова и с помощью методики Керн С7. В качестве объекта исследований выбран пласт ЮС₂ на Федоровском месторождении. Все шлифы характеризуют породы этого пласта. В связи с высокой степенью уплотнения и значительными вторичными изменениями минералов под-

счет гранулометрического состава пород этого пласта традиционным ситовым методом невозможен. Применение Керн С7 рассчитано как раз на такие объекты. По минералогическому составу пород наибольшие расхождения наблюдаются в определении обломков пород. Это может быть связано как с неоднородностью шлифа, так и с работой оператора. Ошибка оператора может возникать при выделении обломков пород в процессе анализа, так как при работе только с видеоизображением, без возможности посмотреть на микроскопе зерна вызывающие сомнения, часть сильно измененных зерен полевых шпатов может ошибочно относиться к обломкам пород. Тем не менее, для всех по минеральному составу шлифы, обчисленные по разным методикам, попадают в один класс пород по классификации Шутова В.Д. Различия в содержании биотита и мусковита связаны с неравномерным распределением этих минералов по шлифам. В целом отмечается хорошая сходимость результатов по минеральному составу.

Открытая пористость, определенная при помощи Керн С7 обычно выше, чем по Черникову. Это связано с тем, что часть поры, заполненная каолинитом, при сегментации и выделении пор оператором относится к порам, а по методике Черникова эти участки пор считаются как глинистый цемент и относятся к каолиниту. Иногда также происходит занижение содержания биотита при автоматическом подсчете из-за того, что сидеритизированный биотит программой относится к сидериту.

При определении гранулометрического состава при помощи Керн С7 отмечается некоторое снижение содержания крупных зерен. Это связано с большей вероятностью попадания такого зерна на границу области анализа. Соответственно такие зерна отбрасываются. Попытка работать на меньшем увеличении приводит к потере зерен мелких фракций, которые теряются при морфологических операциях. С другой стороны, по методике Черникова зерна идеализируются как эллипсоиды и диаметр или размер зерна определяется, как среднее между большим и малым диаметрами эллипсоида. В Керн С7 диаметр частицы рассчитывается как диаметр

круга той же площади. Это приводит к снижению средних размеров при равных условиях. Чаще всего такое изменение происходит в пределах одной фракции, но иногда отмечается смещение моды распределения, полученного в результате работы методики Керн С7, на одну фракцию в сторону меньших размеров фракций по сравнению с распределением по методике Черникова О.А. Для мелких фракций также наблюдается снижение их содержания при подсчете в Керн С7.

Указанные расхождения попадают в пределы погрешности измерений и могут быть связаны с разным количеством зерен при подсчете.

Из приведенных данных следует, что результаты работы процедуры автоматического определения вещественного и гранулометрического состава, в большинстве случаев требуют дополнительной коррекции с привлечением эксперта - петрографа. Вместе с тем, разработанная методика обладает следующими преимуществами:

1. Ускорение времени анализа.
2. Возможность получения точных количественных данных о гранулометрическом и вещественном составе породы.
3. Повышение производительности труда специалиста - петрографа.

Заключение

В процессе решения поставленной задачи была разработана технология автоматизации традиционного метода петрографического анализа вещественного и гранулометрического состава породы, которая позволяет:

- формализовать методику поляризационного исследования, объективно зафиксировать динамику изменения интенсивности и окраски оптически активных фаз.
- повысить эффективность работы не только в рутинных измерениях, но и в исследованиях минерального состава
- уменьшить время работы оператора
- повысить объективность результатов и снизить требования к квалификации персонала.

Разработанная методика позволяет проводить количественный анализ как прозрачных шлифов, так и порошков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусова О.Н., Михина В.В. Общий курс петрографии. М.: Недра, 1972, 344с., ил.
2. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. М.: ИЛ, 1977, 249 с.
3. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. М: Изд-во стан-
- дартов, 1994. 23 с.
4. Кадушников Р.М., Каменин И. Г., Алиевский В. М. Метод морфологического восстановления сетки границ зерен. Цифровая микроскопия: Материалы школы – семинара. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 91 с.

* * * * *

AUTOMATION OF PETROGRAPHIC METHOD FOR IDENTIFICATION OF ROCK PHASE AND GRANULOMETRICAL CONTENT.

V.M.Alievskiy, V.V.Gaidukov, Y.R.Yakovlev, R.M.Kadushnikov, I.V.Fedortzov

The paper describes image analysis designed for automating petrographic research of rock probes. The complex performs the tasks of determining probe phase and granulometric content by analyzing interference coloring of minerals on series of images captured under different angles of rotating the microscope stage. Phase content is determined for reconstructed image that summates information of object color and brightness for each rotation angle. Data clusterization methods are used to determine phase content.

Приложение 1

Сопоставление минералогического состава обломков по шлифу.
Подсчет по методике Черникова О.А. и с помощью Керн С7

Образец	Метод подсчета	Породообразующие минералы																	Аутигенные					Глинистый цемент, всего	Открытые поры	
		Кварц				Полевые шпаты				Обломки пород, всего	Слюды						Акцессорные минералы, всего									
		обычный	растворенный	регенерационный	другой	всего	неизмененные	слабоизмененные	среднеизмененные		сильноизмененные	всего	биотит	биотит гидротизованный	биотит сидеритизированный	Мусковит		хлорит	всего	Лейкоксен	Кальцит	Сидерит	Уголь			Всего на породу
11150-02	Подсчет по методике Черникова	10,4	0,0	15,0	0,0	25,4	2,7	17,6	7,4	4,7	32,5	19,7	0,0	0,7	1,4	1,2	1,0	4,2	0,5	0,46	5,10	3,47		9,04	3,50	5,21
	Подсчет по методике СИАМС					26,9					36,2	17,8			0,7	0,4					5,9	3,9		9,7		8,4
11160-02	Подсчет по методике Черникова	6,8	0,0	9,0	0,0	15,8	1,8	27,4	11,5	4,7	45,4	23,1	0,0	0,3	0,8	1,5	0,5	3,1	0,0			2,35	1,2	4,05	4,36	4,14
	Подсчет по методике СИАМС					21,0					51,3	16,9			1,4	0,4					0,34	3,23		3,57		5,38
11170-02	Подсчет по методике Черникова	10,5	0,0	16,3	0,0	26,8	5,7	32,0	10,7	3,8	52,2	16,5	0,5	1,1	1,0	0,5	1,6	4,6	0,0	0,34	1,81	1,09		3,25	4,69	4,17
	Подсчет по методике СИАМС					20,2					48,9	24,9			0,2	0,3					2,55	0,85				2,13